

УДК 519.63, 004.942

DOI 10.22213/2413-1172-2018-4-174-181

## ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

**Т. Редер**, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**В. А. Тенев**, доктор физико-математических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Н. В. Паклина**, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрена модель газодинамических процессов в предохранительном клапане прямого действия, предназначенном для обеспечения безопасности трубопроводов и аппаратов высокого давления. Моделирование осуществлялось на основе метода контрольного объема и разностной схемы С. К. Годунова в трехмерной постановке. Внутреннее пространство клапана разделено на два блока, в каждом из которых строится структурированная разностная сетка. В первом блоке сетка является ортогональной. Параметры газа на границах контрольных объемов определяются на основе автомодельного решения задачи о распаде произвольного разрыва.*

*Формирование газодинамических переменных для решения задачи о распаде произвольного разрыва с последующим восстановлением составляющих вектора скорости проводилось с применением преобразований векторов в локальной системе координат на каждой грани контрольного объема.*

*Реализованный численный метод расчета нестационарной трехмерной газодинамики позволяет определять пространственную структуру потока в предохранительном клапане и его количественные характеристики (давление, плотность, скорость, температуру).*

*Анализ результатов расчетов показал, что течение до нижней части диска близко к осесимметричному. Сравнение с результатами расчетов в осесимметричной и трехмерной постановках свидетельствует о том, что интегральная характеристика (газодинамическая сила) может рассчитываться для рассмотренных условий в осесимметричной постановке при соответствующем выборе эквивалентной конфигурации внутреннего контура клапана.*

**Ключевые слова:** газодинамика, численные методы, трехмерное моделирование, схема Годунова, предохранительный клапан, разностные сетки.

### Введение

**П**редохранительные клапаны прямого действия применяются для поддержания заданного уровня давления в различных аппаратах высокого давления. Предохранительный клапан представляет собой механизм, автоматически открывающийся при повышении давления выше рабочего и закрывающийся при снижении давления до рабочего. От стабильности работы клапана зависят характеристики технологических процессов, экономичность и минимизация вредных выбросов в атмосферу. Для расчета необходимых параметров конструкции клапана требуется знать зависимость газодинамической силы, действующей на диск клапана со стороны рабочей среды, от степени открытия клапана и давления в контролируемом объеме.

Методики расчета предохранительных пружинных клапанов, заложенные в стандарты (ГОСТ 12.2.085–2002. Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Тре-

бования безопасности. Введен 2003-07-01. М. : Стандартиформ, 2007. 12 с.; ГОСТ 31294–2005. Клапаны предохранительные прямого действия. Введен 2008-10-01. М. : Стандартиформ, 2008. 31 с.), основаны на эмпирических выражениях. Справочники, применяющиеся за рубежом, также содержат инженерные методики расчета основных характеристик предохранительных клапанов [1, 2] с учетом влияния противодействия и вязкости среды. В работах [3, 4] анализируется математическая модель подпружиненного предохранительного клапана, соединенного с резервуаром сжимаемого газа через трубу. Клапан моделируется с использованием уравнений Ньютона и уравнений одномерной газодинамики. Модель предназначена для понимания неустойчивостей в работе с проточным клапаном. На основе принципов одномерного моделирования разработан инструмент моделирования RELAP5-3D (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) [5]. Клапан моделируется как соединительный элемент между двумя трубами.

Этот инструмент позволяет пользователям моделировать поведение различных рабочих переходных процессов. В работе [6] рассмотрено применение инструмента моделирования работы клапана с предварительным расчетом и аппроксимацией газодинамических сил с применением программного продукта ANSYS FLUENT v.13 в трехмерной и осесимметричной постановках.

Более полные модели исследования газодинамических процессов в предохранительном клапане прямого действия основаны на численном решении уравнений газодинамики в осесимметричной и трехмерной постановках для сжимаемых и несжимаемых сред с применением пакета ANSYS. В работе [7] рассмотрена стационарная геометрия клапана в 3D-постановке. Динамический процесс рассчитан в осесимметричной постановке для несжимаемой жидкости. Динамическая численная модель исследования газодинамических процессов в предохранительном клапане прямого действия представлена в статьях [8, 9]. Решение задачи о газодинамических процессах осуществляется в трехмерной постановке с использованием пакета ANSYS с использованием модели турбулентности. В предположении об осесимметричном силовом воздействии со стороны потока газа на нижнюю часть поверхности диска в работе [10] проведено численное моделирование на основе разностной схемы С. К. Годунова [11].

В настоящей работе реализован метод С. К. Годунова в трехмерной постановке для исследования газодинамики предохранительного клапана.

Схема предохранительного клапана показана на рис. 1.

Клапан соединен через нижнее сопло с контролируемым резервуаром. При давлении ниже допустимого диск прижат к седлу пружиной. При увеличении газодинамической силы, действующей на нижнюю часть диска, диск отходит от седла, и рабочая среда сбрасывается в атмосферу или другую емкость через выпускной патрубок. Внутреннее пространство клапана, как видно из рис. 1, можно разделить на две части: объем с осью симметрии вдоль штока диска и сопла (блок 1) и объем выпускного патрубка с круглым выходным отверстием (блок 2).

#### Метод расчета

Уравнения нестационарной пространственной газодинамики записываются в векторном виде.

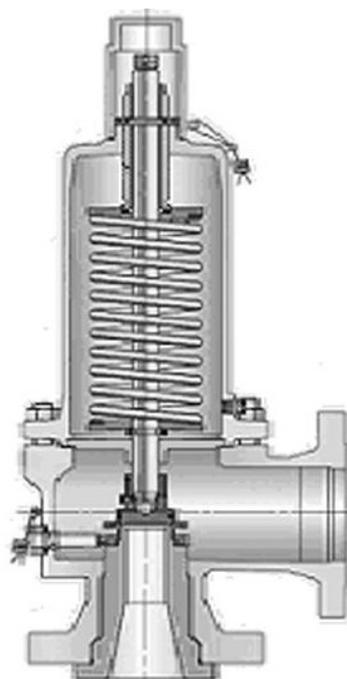


Рис. 1. Предохранительный клапан типа 2J3

Блок 1:

$$\frac{\partial y\mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial y\mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial y\mathbf{B}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \varphi} = \mathbf{f}. \quad (1)$$

Блок 2:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Здесь  $t$  – время;  $x$  – направлена по оси сопла и штока диска в обоих блоках;  $y$  – радиальная координата в первом блоке и направлена по оси патрубка во втором блоке;  $z$  – третья пространственная координата в декартовой системе координат для второго блока;  $\varphi$  – угловая координата в первом блоке.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (e + p)u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ \rho vw \\ (e + p)v \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ p + \rho w^2 \\ (e + p)w \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p + \rho w^2 \\ -\rho vw \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Векторы  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{f}$  содержат газодинамические комплексы, составленные из переменных:  $\rho$  – плотность газа;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – составляющие

вектора скорости  $\mathbf{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ ;  $u$  – составляющая

скорости по оси  $x$ ;  $v$  – радиальная составляющая в первом блоке и составляющая по  $y$  во втором;  $w$  – угловая скорость в первом блоке и составляющая по  $z$  во втором;  $e = \rho\varepsilon + \rho \frac{|\mathbf{V}|^2}{2}$  – полная энергия единицы объема газа;  $\varepsilon = \varepsilon(\rho, p)$  – внутренняя энергия единицы массы, заданная уравнением состояния идеального газа  $p = \rho RT$ ;  $T$  – температура газа;  $R = c_p - c_v$  – газовая постоянная;  $c_p, c_v$  – удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме. Из уравнения состояния следует, что

$\varepsilon = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} = c_v T$ , где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  – показатель адиабаты.

Граничные условия: на входе в сопло условие постоянной энтропии; на твердых стенках условие непротекания; на выходе, в зависимости от расхода газа, либо заданное давление, либо сверхзвуковые условия.

Начальные условия: до зазора давление, как в резервуаре; после зазора давление окружающей среды; скорости нулевые.

Для численного решения систем газодинамических уравнений (1), (2) применяется метод контрольного объема. Для каждой грани с индексом  $l$  выражение для потоков имеет вид

$$\mathbf{Q}_l = \Delta t^n \sigma_l \begin{bmatrix} R(\psi - N) \\ R(\psi - N)U - n_x P \\ R(\psi - N)V - n_y P \\ R(\psi - N)W - n_z P \\ R(\psi - N)E - NP \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $R$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $E$  – «большие» величины, соответствующие плотности, скоростям, энергии и давлению, определяемые из решения задачи о распаде разрыва;  $\psi$  – скорость ребра в направлении нормали;  $N$  – нормальная составляющая вектора скорости;  $\sigma_l$  – площадь поверхности соответствующего ребра.

Параметры газа на границах контрольных объемов определяются по методу С. К. Годунова с использованием автомодельного решения

задачи о распаде произвольного разрыва. После решения задачи о распаде разрыва необходимо восстановить «большие» величины параметры  $R$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $E$ .

Для уравнений (1), записанных в цилиндрической системе координат, строится разностная сетка в блоке 1 в плоскости  $\varphi = \text{const}$  комплексным методом граничных элементов. Контрольные объемы представляют собой секторальные вырезки из цилиндров с криволинейной образующей (рис. 2).

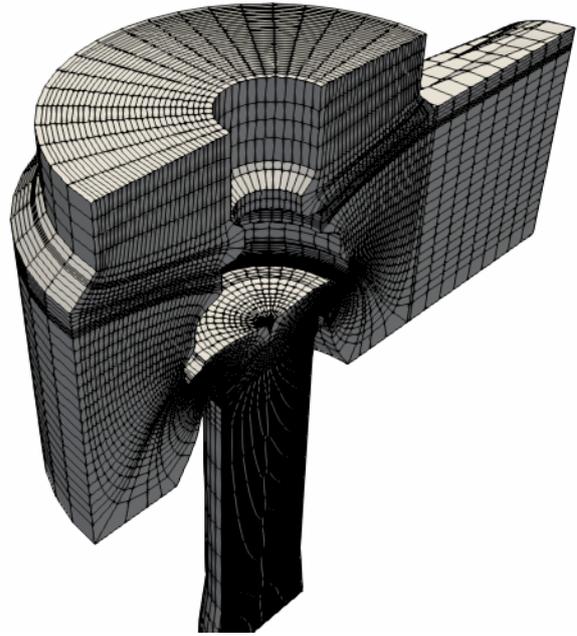


Рис. 2. Разностная сетка

Для таких контрольных объемов нормаль и касательная к боковым граням рассчитываются просто, так как сетка является ортогональной. Уравнения (2) для блока 2 являются общей формой описания трехмерного течения, и контрольные объемы могут иметь вид произвольного многогранника, причем грани не обязательно плоскости. Для пространственного четырехугольника с вершинами 1, 2, 3, 4, пронумерованными против часовой стрелки, вектор нормали имеет составляющие

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = 0,5 \begin{bmatrix} \Delta y_{21} \Delta z_{32} - \Delta y_{32} \Delta z_{21} + \Delta y_{43} \Delta z_{14} - \Delta y_{14} \Delta z_{43} \\ \Delta z_{21} \Delta x_{32} - \Delta z_{32} \Delta x_{21} + \Delta z_{43} \Delta x_{14} - \Delta z_{14} \Delta x_{43} \\ \Delta x_{21} \Delta y_{32} - \Delta x_{32} \Delta y_{21} + \Delta x_{34} \Delta y_{14} - \Delta x_{14} \Delta y_{34} \end{bmatrix},$$

где, например,  $\Delta x_{21} = x_2 - x_1$ . Тангенциальный вектор возьмем в виде

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_{31} \\ \Delta y_{31} \\ \Delta z_{31} \end{bmatrix}.$$

Векторы  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{T}$  нормируются, и третий орт определим, как векторное произведение

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = [\mathbf{N} \times \mathbf{T}].$$

Проекции вектора скорости на орты, необходимые для решения задачи о распаде разрыва, – это скалярные произведения:

$$N = (\mathbf{V}, \mathbf{n}); T = (\mathbf{V}, \mathbf{T}); K = (\mathbf{V}, \mathbf{K}).$$

После решения задачи о распаде произвольного разрыва восстанавливаются «большие» величины скорости:

$$U = n_x N + \tau_x T + k_x K;$$

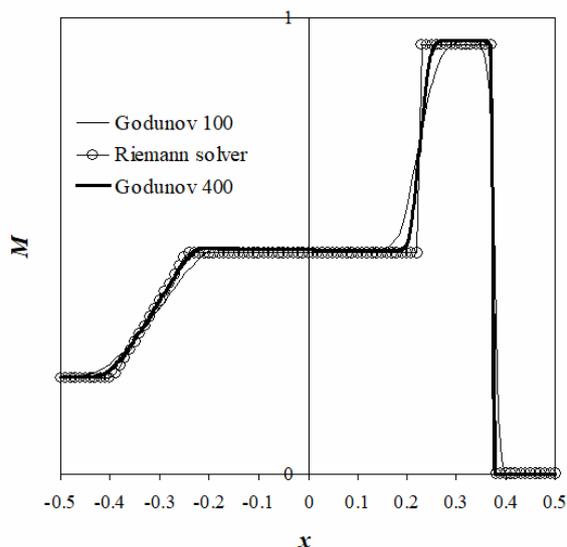
$$V = n_y N + \tau_y T + k_y K;$$

$$W = n_z N + \tau_z T + k_z K,$$

и вычисляются потоки (3) через соответствующие грани. Переход к следующему шагу по времени осуществляется по формулам:

$$\mathbf{q}_{i,j,k}^{n+1} G_{i,j,k}^{n+1} = \mathbf{q}_{i,j,k}^{n+1} G_{i,j,k}^n - \sum_l \mathbf{Q}_l + \mathbf{f}_{i,j,k}^n G_{i,j,k}^n \Delta t^n \quad (\text{блок 1});$$

$$\mathbf{q}_{i,j,k}^{n+1} = \mathbf{q}_{i,j,k}^{n+1} - \frac{1}{G_{i,j,k}^n} \sum_l \mathbf{Q}_l \quad (\text{блок 2}),$$



где  $i, j, k$  – номер контрольного объема;  $G_{i,j,k}^n$  – величина контрольного объема на временном шаге  $n$ ; суммирование потоков проводится по всем граням контрольного объема. В первом блоке контрольные объемы деформируются при движении диска, во втором в течение времени не изменяются.

В качестве теста рассмотрим трехмерную задачу расширения невязкого нетеплопроводного газа в ударной круглой трубе. Совершенный газ невязкий нетеплопроводный слева и справа от перегородки находится при различных начальных условиях [12]. Сравним аналитическое решение с численным для двух вариантов, имеющих специфику нашей задачи.

Вариант 1 (задача Лакса): момент времени 0,15;

$$p_L = 3,528; T_L = 7,928; u_L = 0,698;$$

$$p_R = 0,571; T_R = 1,142; u_R = 0.$$

Вариант 2 (число Маха на выходе справа)  $M = 3$ : момент времени 0,09;

$$p_L = 10,333; T_L = 2,679; u_L = 0,92;$$

$$p_R = 1; T_R = 1; u_R = 3,55.$$

В расчете использовалась разностная сетка  $400 \times 10 \times 5$ .

Сравнение результатов приведено на рис. 3 для распределения числа Маха вдоль трубы (наиболее сложного для воспроизведения).

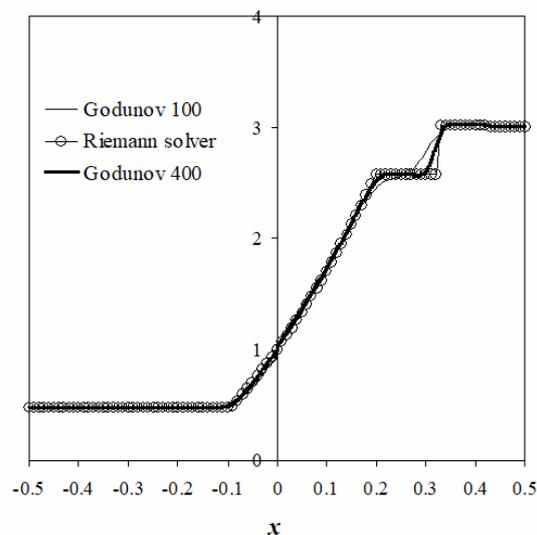


Рис. 3. Изменение числа Маха по длине ударной трубы

Результаты получились такими же, как для осесимметричной задачи [13]. Левый рисунок соответствует первому варианту, правый – вто-

рому. Расчет проводился для числа узлов по оси трубы 100 и 400. В радиальном и угловом измерении выбрано по 10 точек. Метод С. К. Году-

нова является монотонным с первым порядком аппроксимации. Схема не дает нефизических колебаний решения, как в области ударной волны, так и в области контактного разрыва.

#### Анализ результатов расчетов

Рассмотрим результаты для двух значений величины зазора (подъема диска) – 10 и 1 мм при давлении 11,6 бар.

Структура течения в предохранительном клапане показана на рис. 4, где изображены трубки тока. Однородный поток проходит через

входное сопло и после зазора разделяется на три части. Первая часть потока из зазора сразу направляется в выходной патрубок по кратчайшему пути. Вторая часть потока уходит вниз по направлению течения из зазора, затем разворачивается вдоль стенки вверх и уходит в выходную линию. При этом образуется вихрь над диском. Третья часть течения представляет собой подковообразный вихрь в нижней области пространства за зазором.

Для меньшего зазора 1 мм структура течения представлена на рис. 5.

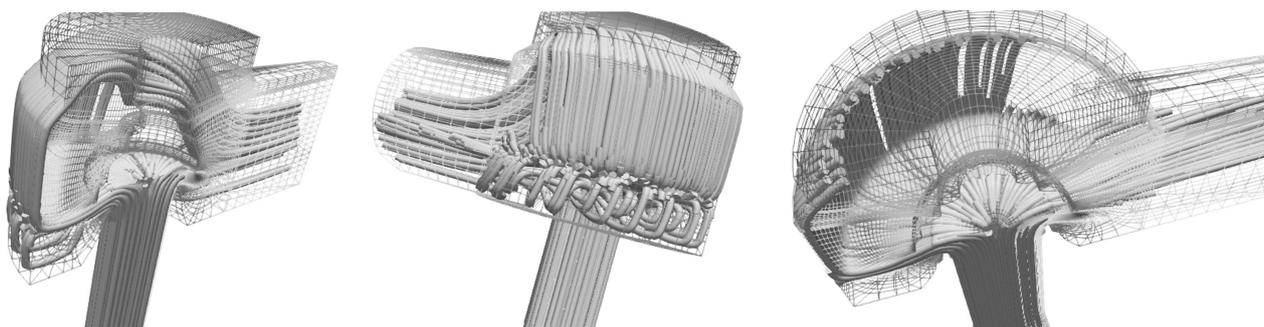


Рис. 4. Трубки тока, высота подъема диска 10 мм

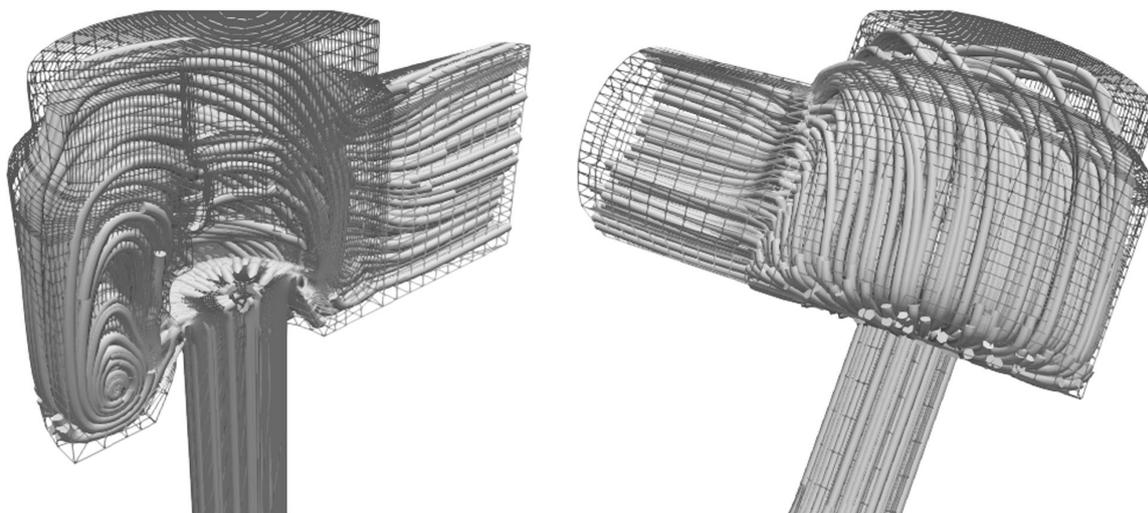


Рис. 5. Трубки тока, высота подъема диска 1 мм

При небольшом расходе газа через зазор поток имеет две части. Первая часть, как и в предыдущем примере, проходит из зазора в выходную линию. Вторая часть, составляющая основную долю потока, через вихревое движение выходит в атмосферу. Третьей части в этом случае не наблюдается.

Газодинамическая сила, действующая на диск, определяется интегрированием давления по всем движущимся поверхностям (диск, шток):  $F_{fluid} = \int_{S_d} p ds$ . Поэтому рассмотрим рас-

пределения давления в нескольких точках, обозначенных на рис. 6.

На рис. 6 показано продольное сечение клапана с оттенками серого цвета, соответствующими уровню давления. Точки 1, 2 расположены на нижней поверхности диска со стороны сопла. Точки 3, 4, 5 находятся с верхней стороны диска.

Рассмотрим изменение давления по угловой координате. Рисунок 7 соответствует нижней поверхности диска.

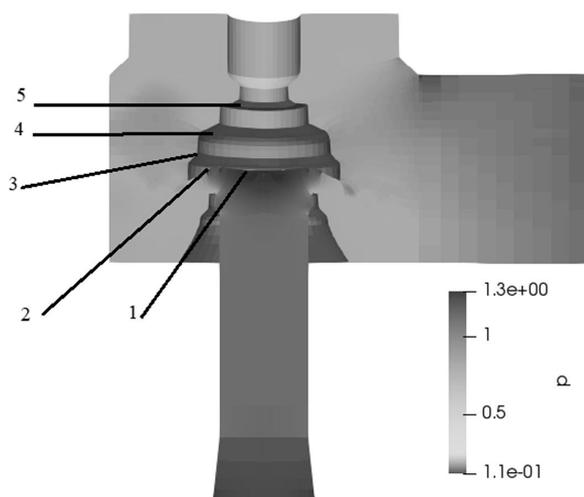


Рис. 6. Продольное сечение клапана

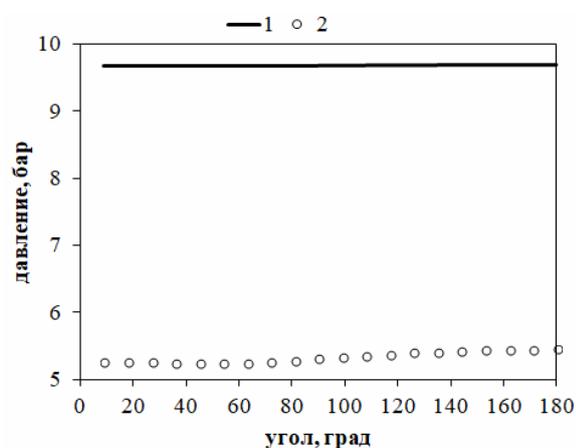


Рис. 7. Распределение давления под диском по угловой координате, зазор 10 мм

Из рис. 7 следует, что давление на нижней части диска слабо зависит от угла. Только на краю диска давление понижается в области напротив выходного патрубка. В верхней части диска изменение давления более существенное (рис. 8).

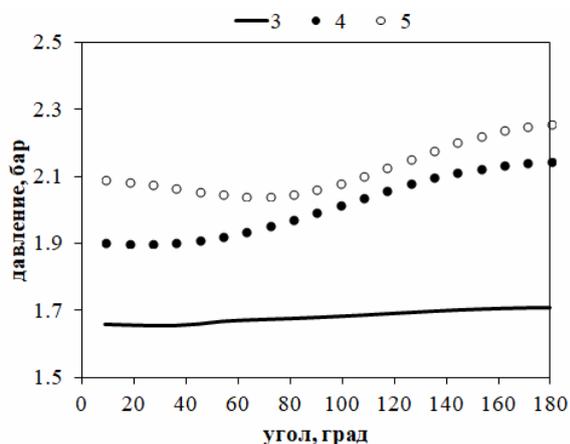


Рис. 8. Распределение давления над диском по угловой координате, зазор 10 мм

При малом зазоре давление не изменяется по угловой координате. В точке 1 величина давления 9,42 бар, в точке 2 – 7,03 бар. В наддисковом пространстве давление почти однородно (рис. 9).

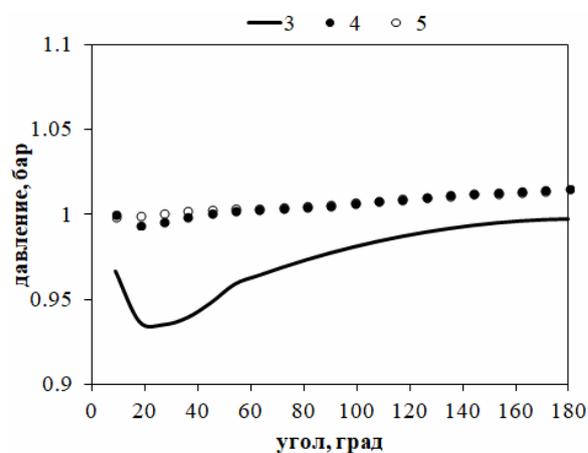


Рис. 9. Распределение давления над диском по угловой координате, зазор 1 мм

Полученные результаты расчетов подтверждают сделанное в работах [14, 15] предположение о возможности применения осесимметричной постановки задачи для некоторых конструкций предохранительных клапанов. На рис. 10 представлено сравнение распределений давления по образующей диск – шток, полученных в трехмерной и осесимметричной постановках.

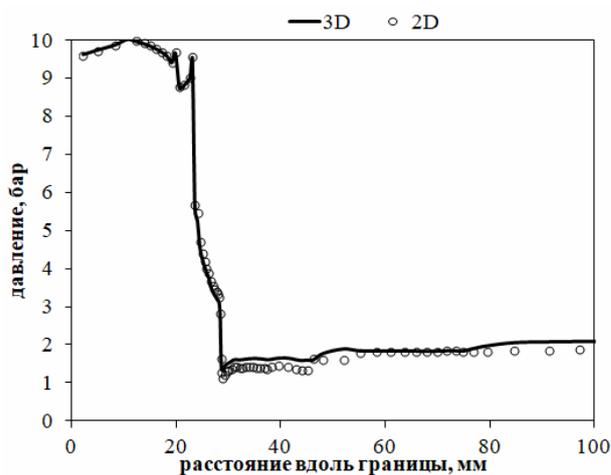


Рис. 10. Распределение давления по образующей диск – шток, зазор 10 мм

При осесимметричном расчете боковой патрубков не учитывается. Поток выходит наружу в верхней части корпуса клапана с диаметром, равным диаметру выходного сечения патрубка. Как следует из рис. 9, полученные расчетом распределения давления близки между собой.

Схожей является и динамика поведения газодинамической силы в процессе установления течения, показанная на рис. 11.

На рис. 11 сплошными линиями показаны зависимости для сил, рассчитанные в трехмерной постановке. Маркеры соответствуют осесим-

метричному расчету. Жирная линия описывает поведение полной газодинамической силы, тонкая линия соответствует силе, действующей на диск со стороны потока сверху. Для осесимметричного варианты этим силам сопоставлены маркеры-кружки и маркеры-крестики.

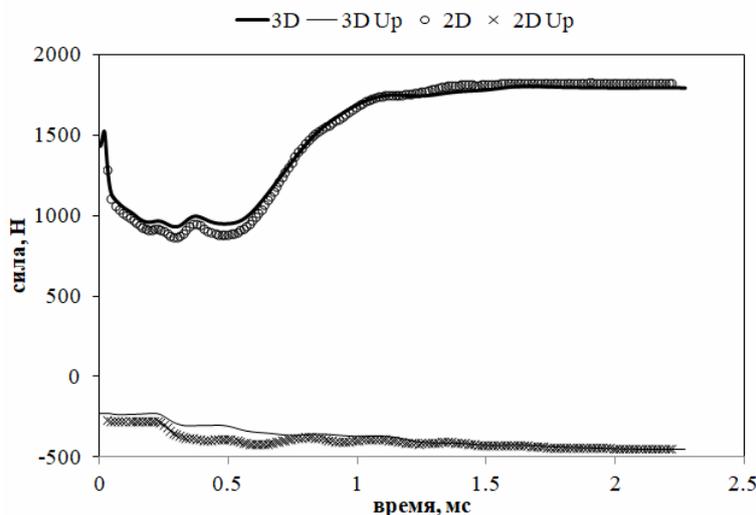


Рис. 11. Изменение газодинамической силы во времени

### Заключение

Реализованный численный метод расчета нестационарной трехмерной газодинамики позволяет определять пространственную структуру потока в предохранительном клапане и его количественные характеристики (давление, плотность, скорость, температуру).

Анализ результатов расчетов показал, что течение до нижней части диска близко к осесимметричному. Сравнение с результатами расчетов в осесимметричной и трехмерной постановках свидетельствует о том, что интегральная характеристика (газодинамическая сила) может рассчитываться для рассмотренных условий в осесимметричной постановке при соответствующем выборе эквивалентной конфигурации внутреннего контура клапана.

### Библиографические ссылки

1. Pentair Pressure Relief Valve Engineering Handbook. *Forward Technical Publication*, 2015, TP-V300, p. 800.
2. Flow Equations for Sizing Control Valves. ISA-S75.01-1985 (R 1995), p. 50.
3. Gábor Licskó, Alan Champneys, Csaba Hős. Dynamical Analysis of a Hydraulic Pressure Relief Valve. *Proc. World Congress on Engineering-2009 (July 1-3)*. Vol. II. London, UK.
4. Hos C. J., Champneys A. R., Paulc K., McNeelyc M. Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves in gas service: model development, measurements

and instability mechanisms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, vol. 31, pp. 70-81.

5. RELAP5/mod 3.3 code manual. Vol. I. Information systems laboratories, Inc., Rockville, Maryland, Idaho Falls. Idaho, 2003.

6. Budziszewski Anna, Thoren Louise. CFD simulation of a safety relief valve for improvement of a one-dimensional valve model in RELAP5: Master's thesis in the Master's program Innovative and Sustainable Chemical Engineering. Gothenburg, Sweden, 2012, p. 82.

7. Beune A. Analysis of high-pressure safety valves Eindhoven. Technische Universiteit Eindhoven, 2009, p. 134. DOI: 10.6100/IR652510.

8. Song X., Cui L., Cao M., Cao W., Park Y., Dempster W. M. A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel. *Energy Conversion and Management*, 2014, pp. 407-419.

9. Liu Yang, Zhoujie Wang, William Dempster, Xinhai Yu, Shan-Tung Tu. Experiments and transient simulation on spring-loaded pressure relief valve under high temperature and high pressure steam conditions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 45, pp. 133-146.

10. Численное моделирование газодинамики предохранительного клапана / Т. Редер, В. А. Тенев, М. Р. Королева, О. В. Мищенко, О. А. Воеводина // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 4. С. 4–11.

11. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. М. : Наука, 1976, 400 с.

12. *Wesseling Pieter*. Principles of computational fluid dynamics. *Springer series in computational mathematics*, 1991, p. 644. ISSN 0179-3632; 29.

13. *Редер Т., Тенев В. А., Паклина Н. В.* Исследование влияния величины начального зазора на динамику открывания предохранительного клапана // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 2. С. 28–40.

14. *Beune A.* Указ. соч.

15. Численное моделирование газодинамики предохранительного клапана.

### References

1. Pentair Pressure Relief Valve Engineering Handbook. *Forward Technical Publication*, 2015, TP-V300, p. 800.

2. Flow Equations for Sizing Control Valves. ISA-S75.01-1985 (R 1995), p. 50.

3. *Gábor Licskó, Alan Champneys, Csaba Hős*. Dynamical Analysis of a Hydraulic Pressure Relief Valve. *Proc. World Congress on Engineering-2009 (July 1-3)*. Vol. II. London, UK.

4. *Hos C. J., Champneys A. R., Paulc K., McNeelyc M.* Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves in gas service: model development, measurements and instability mechanisms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, vol. 31, pp. 70-81.

5. RELAP5/mod 3.3 code manual. Vol. I. Information systems laboratories, Inc., Rockville, Maryland, Idaho Falls. Idaho, 2003.

6. *Budziszewski Anna, Thoren Louise*. CFD simulation of a safety relief valve for improvement of a one-dimensional valve model in RELAP5: Master's thesis in the Master's program Innovative and Sustainable Chemical Engineering. Gothenburg, Sweden, 2012, p. 82.

7. *Beune A.* Analysis of high-pressure safety valves Eindhoven. Technische Universiteit Eindhoven, 2009, p. 134. DOI: 10.6100/IR652510.

8. *Song X., Cui L., Cao M., Cao W., Park Y., Dempster W. M.* A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel. *Energy Conversion and Management*, 2014, pp. 407-419.

9. *Liu Yang, Zhoujie Wang, William Dempster, Xinhai Yu, Shan-Tung Tu*. Experiments and transient simulation on spring-loaded pressure relief valve under high temperature and high pressure steam conditions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 45, pp. 133-146.

10. *Reder T., Tenenev V. A., Koroleva M. R., Mishenkova O. V., Voevodina O. A.* *Chislennoe modelirovanie gazodinamiki predohranitel'nogo klapana* [Numerical simulation of gas dynamics safety valve]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 4-11 (in Russ.).

11. *Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ja., Krajko A. N., Prokopov G. P.* *Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 400 p. (in Russ.).

12. *Wesseling Pieter*. Principles of computational fluid dynamics. *Springer series in computational mathematics*, 1991, p. 644. ISSN 0179-3632; 29.

13. *Reder T., Tenenev V. A., Paklina N. V.* *Issledovanie vlijaniya velichiny nachal'nogo zavora na dinamiku otkryvaniya predohranitel'nogo klapana* [Study of the influence of the value of the initial gap on the opening dynamics of a safety valve]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, vol. 16, no.2, pp. 28-40 (in Russ.).

14. *Beune A.* Analysis of high-pressure safety valves Eindhoven. Technische Universiteit Eindhoven, 2009, p. 134. DOI: 10.6100/IR652510.

15. *Reder T., Tenenev V. A., Koroleva M. R., Mishenkova O. V., Voevodina O. A.* *Chislennoe modelirovanie gazodinamiki predohranitel'nogo klapana* [Numerical simulation of gas dynamics safety valve]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 4, pp. 4-11 (in Russ.).

### Numerical 3D Simulation of Safety Valve Gas Dynamics

*T. Raeder*, PhD Applicant, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*V. A. Tenenev*, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*N. V. Paklina*, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*A model of gas dynamic processes in direct operated safety valves, designed to ensure the safety of pipelines and pressure vessels, is considered. The simulation is based on S. K. Godunov control volume method and difference scheme in a three-dimensional formulation. Internal space of the valve is divided into two blocks, in each of which a structured difference mesh is constructed. The mesh in the first block is orthogonal. Gas parameters at the boundaries of control volumes are determined on the basis of self-similar solution of the problem of breakdown of an arbitrary discontinuity.*

*To solve the problem with subsequent restoration of velocity vector components, gas dynamic variables are formed through vector transformations in local coordinate system at each face of the control volume.*

*The implemented numerical method of non stationary 3D gas dynamics analysis enables to discover the spatial structure of the flow in the safety valve and its quantitative characteristics (pressure, density, velocity, temperature).*

*Analysis of calculation results proves that the flow beneath the disc bottom is close to axisymmetric. Comparison of calculation results for axisymmetric and 3D formulations indicates that for given conditions the integral characteristic (gas dynamic force) can be calculated in axisymmetric formulation with the appropriate choice of equivalent configuration of the internal contour of the valve.*

**Keywords:** gas dynamics, numerical methods, 3D simulation, Godunov's scheme, safety valve, difference meshes.

Получено 10.09.2018